科学読本

音とオーディオ(12)

平田能睦

11章：デジタル・フィルタ

シンプルなものを考え出すのは，複雑なものを考え出すよりも難しい．これはいまから30年ほど前にオーディオ用デジタル・フィルタの研究に初めて携わった人たちの実感でした．初歩的なローパス・フィルタやハイパス・フィルタをどのように設計したらよいのか考えあぐんでいた，1970年代半ばのことです．

最初の一歩

デジタル・オーディオ時代の到来を見越して，おもに録音分野で用いられているトーン・コントローラなどの音質調整回路をデジタル・フィルタで実現しようとする研究が始まったのは，PCM録音が実用化されてから数年後の1970年代半ばを過ぎてからのことです．

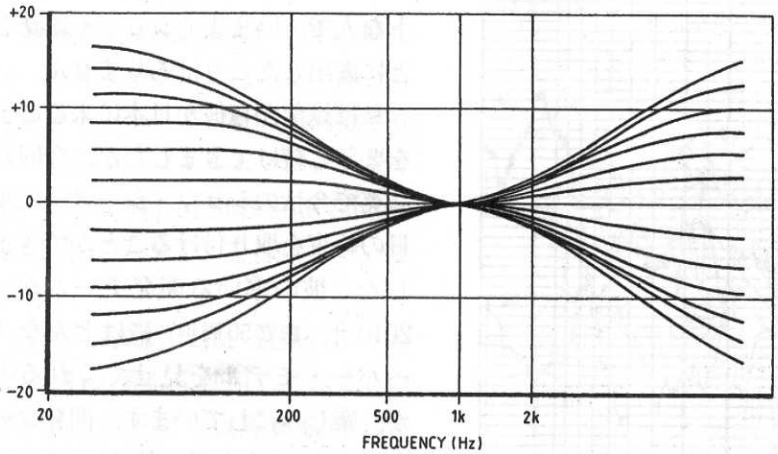
当時，デジタル・フィルタといえば大型コンピュータを用いたもので，アナログ回路では実現できないようなシャープな減衰特性をもったフィルタの設計例などが研究論文で発表されていました．

そのようなデジタル・フィルタの設計法でオーディオ用のフィルタの設計に使えるものは皆無でしたが，1979年に，コンピュータのレベルですが，デジタル・フィルタで得られたグラフィック・イコライザの特性がBBCのテクニカル・レポートに発表されました．とはいっても，その特性を示す式もアルゴリズムもそこには示されていませんでした．

アナログ（analog）は字義的に相似とか類似という意味があります．一方，デジタルは指あるいは10本の指で表わされる数字のディジット（digit）から派生した語です．

アナログ回路が連続的な電気信号波形を扱うのとは対照的に，デジタル回路は離散的なサンプル値を扱います．回路の基本的要素は，アナログはL，C，Rで，デジタルは遅延，加算，係数乗算です．とはいえ，これら3つの要素が対応しているわけではありません．

音質調整によく使用されるトーン・コントローラを簡単なデジタル回路で実現できることがわかったのは，前述のBBCのレポートが発表された1979年のことです（信学技報EA 79-37）．このトーン・コントローラを実際に作り実験するためには，AD変換器などのハードウェア



minimum by G = 0, provided that a turnover frequency f_2 is kept constant.

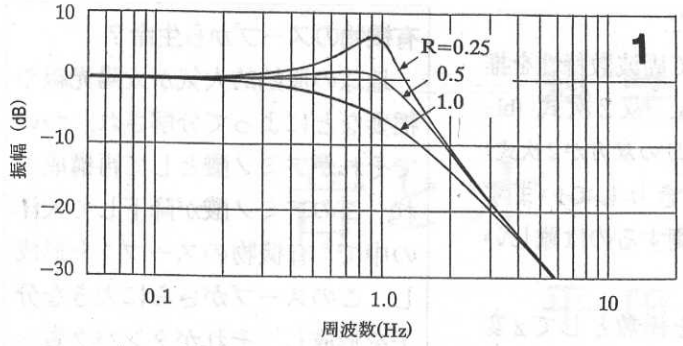
Tone controller

A tone controller can be obtained by the serial combination of the first and second basic digital filter shown in Figs 1 & 2. The transfer function of the tone controller is

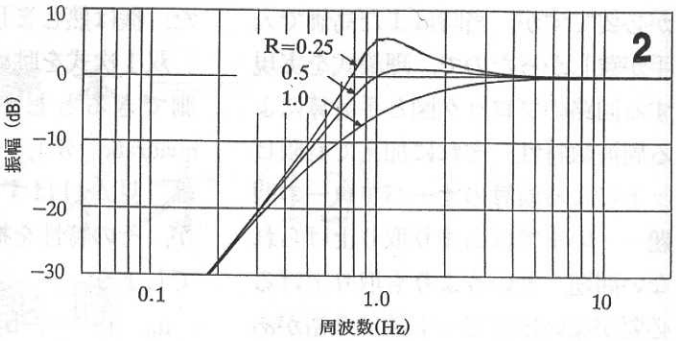
$$D(z)=\frac{1-Az^{-1}}{1-Bz^{-1}}\cdot\frac{1-Gz^{-1}}{1-Hz^{-1}}\cdot\frac{1-H}{1-G} \quad (1)$$

with the low-frequency shelving characteristic defined by two coefficients A and B, and the high-frequency shelving by two coefficients G and H. For example, when the sampling frequency is 44kHz and the

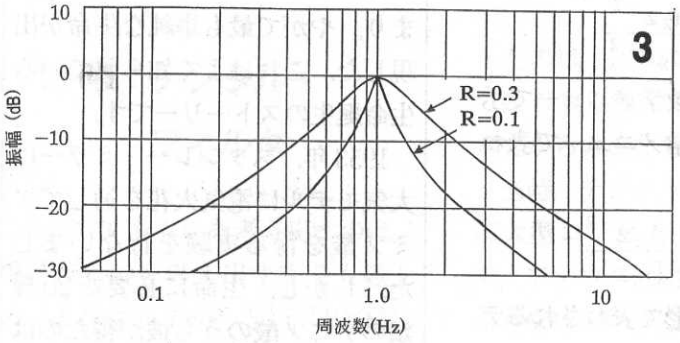
〈11・1図〉『ワイアレス・ワールド（Sept. 1982）』に掲載されたトーン・コントローラの特性とその特性式．パラメータAとBで低域，GとHで高域の特性が変えられる



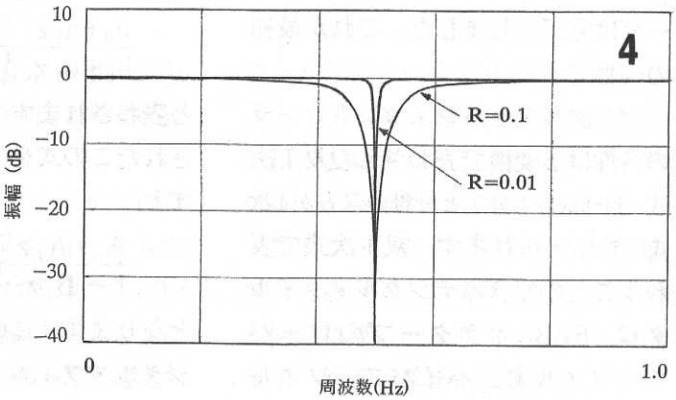
〈11・3❶図〉ローパス・フィルタ（12 dB/oct）



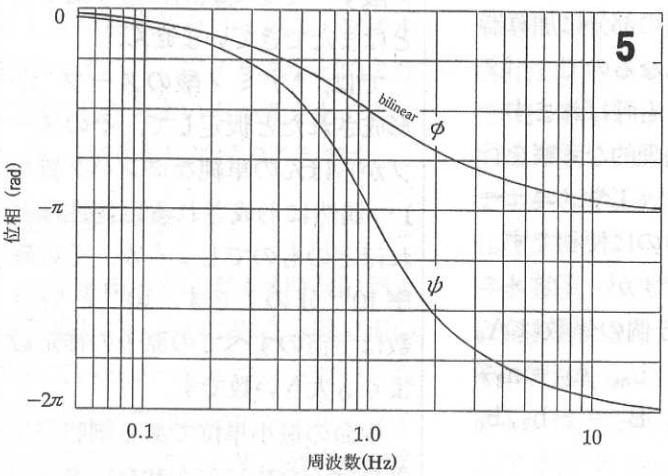
〈11・3❷図〉ハイパス・フィルタ（12 dB/oct）



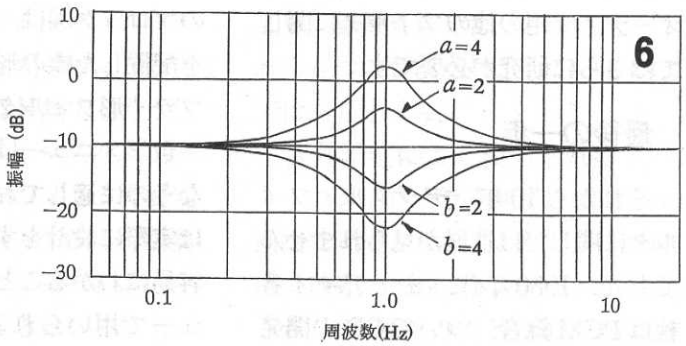
〈11・3❸図〉バンドパス・フィルタ



〈11・3❹図〉ノッチ・フィルタ



◀〈11・3❺図〉オール・パス・フィルタ



▲〈11・3❻図〉パラメトリック・フィルタ

れば，フィルタの周波数特性はコンピュータですぐに求まります．それでA$_0$，A$_1$，…，B$_2$の5個の係数に適当な値を片っ端から与えて，望む特性が得られるまでコンピュータに計算させる，という方法を試みた人たちもいました．この偶然にまかせる方法はどれほど現実的なものでしょうか．

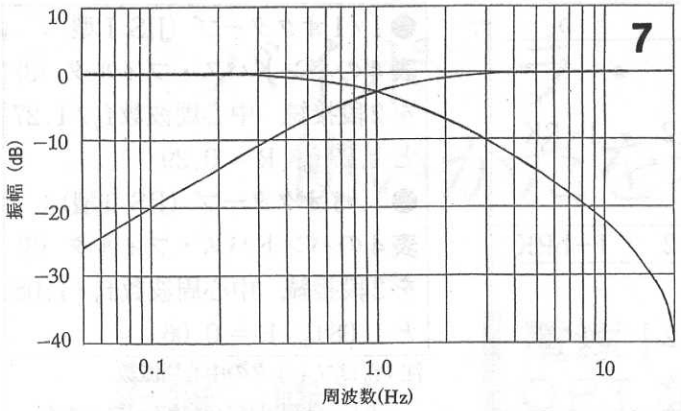
バタフライ形デジタル・フィルタの係数は少なくとも小数点以下4桁の精度が必要です．ここで係数の値を0.0000（小数点以下4桁）から2.0000まで0.0001ずつ変えて，これに正負の符号変化も加えるとすると，約10^{21}個の周波数特性が得られることになります．近似的ですが，オーディオ用デジタル・フィルタの大半のものはそのいずれかの特性で与えられます．

とはいえ，1つの特性を1秒で計算したとしても，このすべての特性の計算を終えるためには100兆年以上の年月が必要です．つまり，偶然による方法ではバタフライは得られない，ということです．

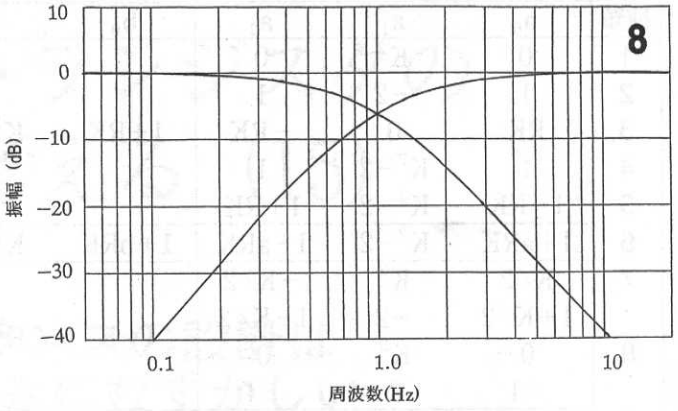
数学メニューの式を使って論理的な方法によりフィルタ係数を求めると，**表4**が得られます．フィルタの種類は**表3**に示した9種類ですが，これを組み合わせれば**表5**に示すような計測用の帯域フィルタが得られます．

これらフィルタの周波数特性1つ1つが，デジタル・フィルタ用の実験ボードを使ってサウンドクラフトの開発部のスタッフにより確認され，オーディオ用デジタル・フィルタの研究は終わりました（MG 1990/4～1991/4）．

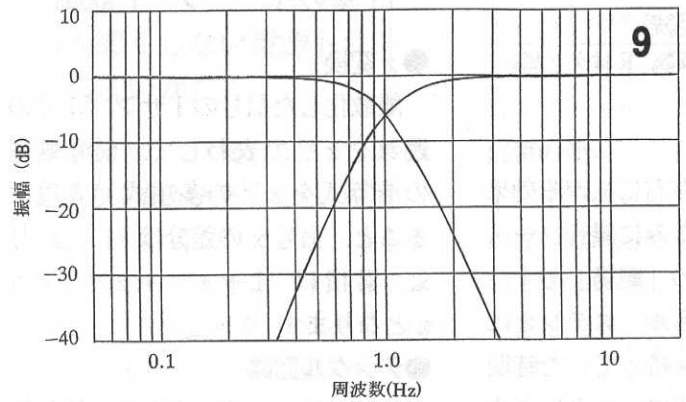
洗練されたアナログ・フィルタは，こうしてデジタル・フィルタに



〈11・3❼図〉2チャネル・フィルタ（6 dB/oct）



〈11・3❽図〉2チャネル・フィルタ（12 dB/oct）



〈11・3❾図〉2チャネル・フィルタ（24 dB/oct）

よっても簡潔な形で表わされることになりました．

くし歯フィルタ

デジタル・フィルタでなければ実現するのが難しいというものがあります．デジタル・フィルタの特徴を活かしたくし歯フィルタ（comb filter）がそれです．

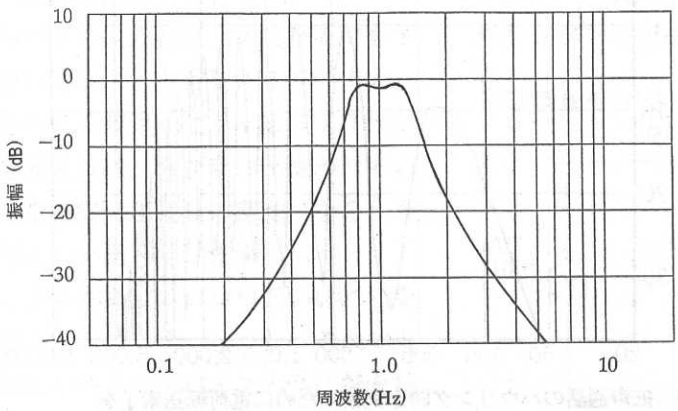
伝送特性の無数の山谷が会話の妨げにならないことは，室の音響特性を研究している人のよく知るところです．電話などの通信の研究に携わる人にとってこれは驚くべきことかも知れませんが，無響室を別にすれば，どんな室の伝送特性にもたくさんの山谷があります．反射音のあるところでは，かならず山谷が生じます．

電気回路でこのような山谷を簡単に作り出すことができれば，拡声電話のハウリング防止や1チャネルによるステレオ信号の記録とその分離が可能になります．どうしたら電気回路でそのような特性を作れるでしょうか．

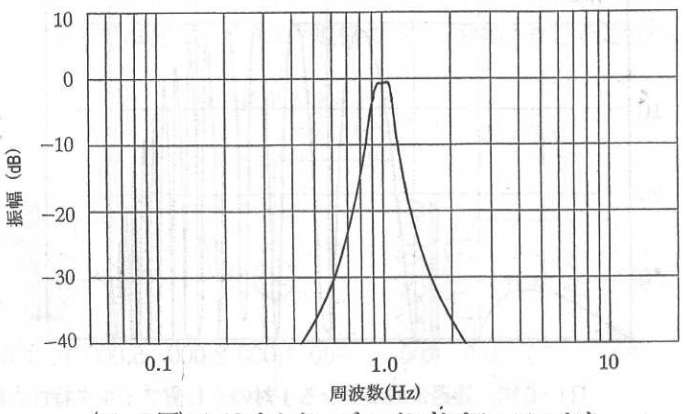
1970年代の初め，まだAD変換器もDA変換器もないころでしたが，遅延手段があればくし歯形の周波数特性を示すフィルタを実現できることがわかり，机上でその応用研究を行なっていました（電子通信学会

❶	ローパス・フィルタ
❷	ハイパス・フィルタ
❸	バンドパス・フィルタ
❹	ノッチ・フィルタ
❺	オールパス・フィルタ
❻	パラメトリック・フィルタ
❼	2チャネル・フィルタ：6 dB/oct.
❽	2チャネル・フィルタ：12 dB/oct.
❾	2チャネル・フィルタ：24 dB/oct.

〈表3〉クアドラティック・フィルタの種類



〈11・4図〉1/1オクターブ・バンドパス・フィルタ



〈11・5図〉1/3オクターブ・バンドパス・フィルタ